

# VU Research Portal

## Muscle load sharing

Praagman, M.

2008

### **document version**

Publisher's PDF, also known as Version of record

[Link to publication in VU Research Portal](#)

### **citation for published version (APA)**

Praagman, M. (2008). *Muscle load sharing: An energy-based approach*. [PhD-Thesis - Research and graduation internal, Vrije Universiteit Amsterdam]. PrintPartners Ipskamp.

### **General rights**

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal ?

### **Take down policy**

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

### **E-mail address:**

[vuresearchportal.ub@vu.nl](mailto:vuresearchportal.ub@vu.nl)

## Samenvatting

### Krachtenverdeling tussen spieren, een energetische benadering.

In het onderzoek naar het menselijk bewegen wordt vaak gebruik gemaakt van biomechanische spierskeletmodellen. Als de houding/positie van een persoon en de externe krachten die op het lichaam aangrijpen bekend zijn, kunnen met een dergelijk model de externe momenten, die heersen rond de verschillende gewrichten, relatief eenvoudig berekend worden. Moeilijker wordt het wanneer de bijdrage van de individuele spieren aan het betreffende externe moment berekend moeten worden. Er zijn namelijk altijd meerdere spieren die het betreffende moment zouden kunnen leveren. Dit wordt het onbepaaldheidsprobleem genoemd. Om dit onbepaaldheidsprobleem op te lossen, maken modellen veelal gebruik van zogenaamde kostfuncties. Hierbij wordt aangenomen dat het centrale zenuwstelsel het spierskelet-systeem optimaal aanstuurt, waarbij een bepaalde grootte (kost) geoptimaliseerd (geminimaliseerd) wordt. Tot op heden is het moeilijk gebleken de juiste kostfunctie te bepalen omdat onbekend is welke grootte tijdens bewegingen geoptimaliseerd wordt. Er kunnen daarom slechts aannames gedaan worden.

De meest gebruikte kostfuncties zijn gebaseerd op spierkracht, waarbij vaak geoptimaliseerd wordt voor maximale spierkracht of voor de fysiologische dwarsdoorsnede van de spier. Het valideren van deze kostfuncties is moeilijk omdat het niet mogelijk is spierkracht in vivo te meten. Daarom blijft validatie meestal beperkt tot het vergelijken van de berekende spierkracht met gemeten spieractiviteit door middel van electromyografie (EMG).

Met name voor submaximale activiteiten wordt vaak aangenomen dat niet de spierkracht, maar het energieverbruik van de spieren geoptimaliseerd wordt. Desondanks bestaan er nog geen kostfuncties die gebaseerd zijn op energieconsumptie. Het doel van dit proefschrift was om een energetische kostfunctie te ontwikkelen en deze vervolgens te valideren aan de hand van een metabole parameter.

Het door een spierskeletmodel voorspelde effect van een spier is afhankelijk van het aantal vrijheidsgraden van het model. Daarbij is niet alleen het aantal vrijheidsgraden van een bepaald gewricht van belang, maar ook het aantal meegenomen aangrenzende gewrichten, aangezien bi- en poly-articulaire spieren over meerdere gewrichten lopen en dus op meerdere gewrichten een effect hebben. Dit betekent dat het effect van kostfuncties idealiter niet bestudeerd zou moeten worden met eenvoudige één- of twee-gewrichtsmodellen maar met behulp van een model dat alle vrijheidsgraden bevat. In dit proefschrift is daarom een 3-

dimensionaal spierskeletmodel van de bovenste extremiteit gebruikt, te weten het Delft Schouder en Elleboog Model (DSEM).

De kostfuncties, die in dit proefschrift zijn bestudeerd, zijn gevalideerd met behulp van Near InfraRed Spectroscopy (NIRS), of wel Nabij-InfraRood Spectroscopie. NIRS is een niet-invasieve methode waarmee de hoeveelheid zuurstof die aanwezig is in een bepaald weefsel (de oxygenatie), bepaald kan worden. Eerder onderzoek heeft aangetoond dat NIRS een valide methode is om de oxygenatie van een spier te bepalen. Er is echter nog weinig bekend over de relatie tussen de met NIRS gemeten zuurstofconsumptie van de spier ( $\dot{V}O_2$ ) en EMG (spieractiviteit).

Als een spier wordt gestimuleerd, komt er calcium vrij uit het sarcoplasmatisch reticulum. Dit zorgt ervoor dat er dwarsverbindingen (cross-bridges) kunnen ontstaan tussen de twee verschillende contractiele eiwitten waaruit de spier bestaat. Hierdoor kan de spier samentrekken en op die manier kracht leveren. De twee processen in de spier die de meeste energie kosten tijdens krachtleverantie zijn 1) het terugpompen van het calcium in het sarcoplasmatische reticulum (activatie-dynamica) en 2) het ontkoppelen van de cross-bridges (contractie-dynamica). Aangezien EMG en NIRS aangrijpen op een verschillend niveau in het krachtsleverantieproces, is het goed mogelijk dat deze twee technieken verschillende resultaten geven. NIRS registreert de zuurstofconsumptie van de spier en geeft daarmee een indicatie van zowel de activatie- als de contractie-dynamica. EMG, daarentegen, registreert alleen de excitatie (prikkeling) van de spier, die leidt tot het vrijkomen van calcium en zou dus alleen een indicatie van de contractie-dynamica moeten geven. De exacte relatie tussen het EMG-sigitaal en het vrijgekomen calcium of het ontkoppelen van de cross-bridges is echter onbekend. Aangezien activatie en kracht niet lineair aan elkaar gerelateerd zijn, verwachtten we dat EMG en  $\dot{V}O_2$  ook niet lineair aan elkaar gerelateerd zouden zijn. Om dit na te gaan hebben we in hoofdstuk 2 experimenten uitgevoerd waarbij we van twee armspieren (de m. biceps brachii caput breve en de m. brachioradialis) zowel EMG als  $\dot{V}O_2$  gemeten hebben tijdens isometrische contracties. Proefpersonen moesten verschillende combinaties van elleboogflexie- en pro/supinatie-momenten leveren op krachtsniveaus, variërend van 10 tot 70% van hun maximale kracht. De resultaten van deze experimenten toonden aan dat er voor zowel EMG als  $\dot{V}O_2$  een lineaire relatie bestaat met het externe moment en dat ook de relatie tussen EMG en  $\dot{V}O_2$  met een lineaire relatie beschreven kan worden.

In hoofdstuk 3 werden opnieuw experimenten met NIRS en EMG uitgevoerd, ditmaal bij vier armspieren (de m. biceps brachii caput breve, de m. biceps brachii caput longum, de m. brachioradialis en de m.

triceps brachii caput laterale). Proefpersonen moesten isometrische contracties uitvoeren waarbij ze verschillende combinaties van flexie/extensie- en pro/supinatie-momenten moesten leveren. De met behulp van NIRS gemeten  $\dot{V}O_2$  werd vervolgens gebruikt om twee verschillende kostfuncties te valideren. De eerste kostfunctie was de "stress kostfunctie". Hierbij wordt spierspanning (= (kracht/fysiologische dwarsdoorsnede)<sup>2</sup>) geminimaliseerd. Dit is één van de meest gebruikte kostfuncties. Ondanks dat eerder aangenomen is dat deze kostfunctie een goede maat zou zijn voor energieverbruik is deze kostfunctie nog nooit eerder gevalideerd met een metabole parameter. De tweede kostfunctie is een in dit proefschrift voor het eerst beschreven kostfunctie, die vanaf nu de energiegerelateerde kostfunctie genoemd zal worden. Deze kostfunctie is gebaseerd op de twee eerder genoemde meest energierovende processen in de spier: het terugpompen van calcium en de ontkoppeling van cross-bridges. De totale metabole kost van een spier wordt bepaald door de som van de kosten van alle geactiveerde sarcomeren (een sarcomeer is de kleinste functionele eenheid van een spier). Daarom moet niet alleen de fysiologische dwarsdoorsnede van de spier, die een maat is voor het aantal parallelle sarcomeren, meegenomen worden, maar ook de vezellengte, die een maat is voor het aantal sarcomeren in serie. In de ontwikkelde energiegerelateerde kostfunctie zijn beide variabelen meegenomen. De verwachting was dat de energiegerelateerde kostfunctie een betere weergave is van het energieverbruik van de spier dan de stress kostfunctie. Beide kostfuncties zijn daartoe geïmplementeerd in de invers dynamische versie van het Delft Schouder en Elleboog Model.

Voor elk van de vier gemeten elleboogspieren werden de experimenteel bepaalde  $\dot{V}O_2$ -waardes vergeleken met de door het model bepaalde kostwaardes. De analyse richtte zich op twee verschillende waardes: de algehele overeenkomst (correlatie en RMSE) tussen de modelvoorspellingen en de experimentele resultaten en het aantal 'vals negatieven' en 'vals positieven' (condities waarvoor het model *geen* spieractiviteit voorspelde terwijl er wel activiteit gemeten was en vice versa). Met de stress kostfunctie werd voor de m. triceps brachii caput laterale een goede overeenkomst tussen  $\dot{V}O_2$  en kost gevonden. Voor de elleboogflectoren was de voorspelde kostwaarde significant lager dan de gemeten  $\dot{V}O_2$ -waarde en werd een groot aantal 'vals negatieven' gevonden. Het leek er op dat de pro/supinatie-momenten, in vergelijking tot de flexie/extensie-momenten, een disproportioneel groot effect hadden op de voorspelde activiteit van deze spieren. De energiegerelateerde kostfunctie vertoonde een betere overeenkomst tussen voorspelde en gemeten waardes en liet ook veel minder 'vals negatieven' zien. Op grond van deze resultaten werd daarom

geconcludeerd dat de energiegerelateerde kostfunctie een betere maat is voor energieconsumptie van de spier dan de stress kostfunctie en tot realistischere voorspellingen van krachtsverdeling (load sharing) tussen spieren leidt.

Ondanks dat in de hierboven beschreven experimenten verschillende combinaties van flexie/extensie- en pro/supinatie-momenten zijn gemeten, werden niet alle mogelijke combinaties gemeten en werd elke meting slechts bij één ellebooghoek (90°) uitgevoerd. Dit laatste betekent dat spierlengte niet werd gevarieerd en dat kracht-lengte-karakteristieken van de spier niet in de kostfunctie geïmplementeerd konden worden. In hoofdstuk 4 zijn daarom nieuwe metingen uitgevoerd waarbij de ellebooghoek (en dus spierlengte) wel gevarieerd werd (van 55° tot 120° elleboogflexie). Er zijn twee verschillende experimenten uitgevoerd. In het eerste experiment werd bij zes proefpersonen van acht elleboogspieren EMG gemeten tijdens 49 combinaties van richting en grootte van het opgelegde moment van elleboog flexie/extensie en pro/supinatie. Alle 49 metingen werden vervolgens herhaald voor vier verschillende ellebooghoeken. De opzet van het tweede experiment was gelijk aan die van het eerste experiment, maar nu werd naast EMG ook  $\dot{V}O_2$  gemeten met NIRS. Aangezien NIRS-metingen erg tijdrovend zijn, werden tijdens dit experiment een kleiner aantal condities (variërend tussen 16 en 36), spieren (3) en proefpersonen (4) gemeten. Door de flexiehoek van de elleboog te variëren werd in dit experiment niet alleen de spierlengte maar ook de momentsarm gevarieerd. Aangezien de maximale kracht, die een spier kan produceren, afhangt van de actuele vezellengte en het moment dat de spier kan leveren afhangt van de actuele momentsarm, ligt het voor de hand dat de ellebooghoek invloed heeft op de spieractiviteit. Het is echter onduidelijk wat het precieze effect van een dergelijke verandering in ellebooghoek is op de krachtsverdeling tussen de spieren. Bekeken vanuit één enkele spier kan verwacht worden dat de spieractiviteit *afneemt* bij de optimum lengte (of momentsarm) aangezien de spier dan dezelfde kracht (of moment) kan produceren met minder activiteit. Vanuit meerdere spieren bekeken, kan echter ook verwacht worden dat het tegenovergestelde gebeurt: de activiteit van de spier neemt toe doordat de spier 'goedkoper' wordt. Dit zou betekenen dat tegelijkertijd de activiteit van (één van) de synergisten (spieren met eenzelfde effect rond een bepaald gewricht) af zou moeten nemen.

De resultaten, beschreven in hoofdstuk 4, laten zien dat gewrichtshoek, en dus momentsarm en spierlengte, zowel het activiteitsniveau van de spier als de krachtsverdeling tussen de spieren beïnvloedt. De wetmatigheden achter deze krachtsverdeling waren moeilijk te

achterhalen omdat het onmogelijk was om alle individuele aspecten die invloed hebben op de spieractiviteit van elkaar te scheiden. De resultaten bevestigden verder de conclusie uit hoofdstuk 2 dat de relatie tussen EMG en  $\dot{V}O_2$  een lineaire relatie is. Deze relatie werd niet beïnvloed door ellebooghoek. Een andere belangrijke bevinding was dat, ondanks dat proefpersonen over het algemeen vergelijkbare patronen van spieractiviteit lieten zien, er ook enkele opvallende interindividuele verschillen gevonden werden. Als er vanuit gegaan wordt dat personen dezelfde optimalisatiestrategie gebruiken, is een mogelijke verklaring voor de gevonden interindividuele verschillen dat de proefpersonen verschillen in spiermorfologie. Aangezien biomechanische modellen normaal gesproken gebruik maken van één antropometrische data-set, kunnen dergelijke verschillen niet voorspeld worden.

In hoofdstuk 5 is daarom onderzocht of de overeenkomst tussen modelvoorspellingen en de gemeten zuurstofconsumptie (zoals gepresenteerd in hoofdstuk 4) verbeterd kon worden door voor iedere proefpersoon geïndividualiseerde morfologische data te gebruiken. Als proefpersonen inderdaad verschillen in spiermorfologie, is het mogelijk dat voor iedere proefpersoon een andere combinatie van bijvoorbeeld fysiologische dwarsdoorsnede en momentsarmen tot een betere overeenkomst tussen modelvoorspellingen en experimentele data leidt. Tevens werd de interactie tussen morfologie en kostfunctie onderzocht. Ook in dit hoofdstuk werd het DSEM gebruikt voor de modelsimulaties en werden opnieuw de stress kostfunctie en de energiegerelateerde kostfunctie met elkaar vergeleken. In dit experiment werd in het model een andere (nieuwere) morfologische data-set gebruikt dan in hoofdstuk 3. Deze nieuwe data-set bevat ook gegevens van optimale vezellengte wat het mogelijk maakte ook kracht-lengte-karakteristieken te implementeren. De energiegerelateerde kostfunctie kon hierdoor zodanig worden herschreven dat de kracht-lengte-relatie van de spier meegenomen werd.

In het model werden vervolgens van acht armspieren de fysiologische dwarsdoorsnedes en momentsarmwaardes gevarieerd. Er werd gebruik gemaakt van een indirecte strategie om voor iedere proefpersoon een bij benadering optimale individuele parameterset te vinden. Modelsimulaties die gedaan worden met deze individuele parameterset, zouden in theorie het best overeen moeten komen met de gemeten data. De overeenkomst tussen de experimentele data en de modelvoorspellingen, die gedaan zijn met de optimale morfologische data set, kan daarom gezien worden als de maximale verbetering die bereikt kan worden door het gebruik van individuele morfologiegegevens. De resultaten lieten zien dat de krachtsverdeling tussen spieren niet alleen sterk afhangt van de gekozen kostfunctie maar ook

van de gekozen morfologie. De modelresultaten verbeterden inderdaad door de morfologische parameters zo te kiezen dat er een zo goed mogelijke fit ontstond tussen de experimentele data en de modeluitkomsten. Een deel van de gevonden interindividuele variatie in de experimentele data kon hierdoor worden verklaard.

Het fitten van de individuele morfologiegegevens bleek overigens alleen effectief voor de energiegerelateerde kostfunctie. Ondanks dat nog niet alle 'vals negatieven' verdwenen door het gebruik van de individuele morfologiegegevens, liet de energiegerelateerde kostfunctie opnieuw een veel betere overeenkomst met de experimentele data zien dan de stress kostfunctie. De overgebleven 'vals negatieven' werden met name gevonden in condities die een moment betroffen waarvoor de betreffende spier geen effect of zelfs het tegenovergestelde effect had. Het lijkt er op dat deze spieren in deze condities geactiveerd worden omdat ze of een ongewenst effect van één van de andere spieren moeten compenseren dan wel vanwege het effect dat ze op één van de andere vrijheidsgraden hebben.

In hoofdstuk 6, de epiloog, zijn de belangrijkste bevindingen van dit proefschrift samengevat en bediscussieerd. Dit proefschrift laat zien dat het gebruik van NIRS om de zuurstof consumptie in de spier te bepalen, een waardevolle methode is voor het valideren van kostfuncties. Het is ook duidelijk geworden dat optimale krachtsverdeling tussen spieren niet altijd leidt tot een en hetzelfde activiteitspatroon tussen spieren en dat deze door verschillende factoren wordt beïnvloed. Aangezien de exacte principes achter de krachtsverdeling tussen de spieren nog steeds onbekend zijn, blijft het lastig om de juiste kostfunctie voor menselijke bewegingen te vinden. Daarbij komt dat validatie van de kostfunctie bemoeilijkt wordt door het feit dat de voorspelde krachtenverdeling niet alleen bepaald wordt door de gekozen kostfunctie, maar ook door andere factoren, zoals de gebruikte morfologische parameters. Het is moeilijk, misschien zelfs onmogelijk, om de individuele effecten van de verschillende morfologische parameters op de voorspelde krachtenverdeling van elkaar te scheiden. Bovendien kan validatie van kostfuncties eigenlijk alleen maar gedaan worden met behulp van meervoudige spier- en gewrichtsmodellen, die zowel het werkelijke aantal vrijheidsgraden als alle relevante aangrenzende gewrichten meenemen.

Het is duidelijk dat de stress kostfunctie geen realistische patronen van spieractiviteit voorspelt, omdat tijdens de experimenten een relatief groot aantal 'vals negatieven' en 'vals positieven' gevonden is. De energiegerelateerde kostfunctie doet het beter dan de stress kostfunctie, maar heeft toch ook nog enige verbetering nodig. Bij de energiegerelateerde kostfunctie werden 'vals negatieven' met name

gevonden worden in paradoxale condities, waarin de geactiveerde spier slechts aan één van de gevraagde momenten of zelfs helemaal niet direct aan het gevraagde moment bijdraagt. Dit benadrukt het belang van het meten van veel verschillende condities, die alle vrijheidsgraden beslaan.

Aangezien er nog enige discrepanties gevonden zijn tussen de energiegerelateerde kostfunctie en de experimentele data kan afgevraagd worden of het wel energieverbruik is dat tijdens bewegingen geoptimaliseerd wordt. Daarnaast kan ook betwist worden of de in dit proefschrift gepresenteerde kostfunctie wel een valide beschrijving is van het energieverbruik van de spier. Verdere verbetering kan mogelijk bereikt worden door de weegfactoren van de kostfunctie te optimaliseren. Daarnaast zou ook onderzocht moeten worden of energieverbruik wellicht geoptimaliseerd wordt op het niveau van de individuele spier in plaats van op het niveau van de totale energieconsumptie. Uitgaande van de gevonden interindividuele verschillen kan ook gesuggereerd worden dat er helemaal geen algemeen optimalisatie-principe bestaat en dat verschillende personen verschillende optimalisatiestrategieën gebruiken. De resultaten van hoofdstuk 5 geven echter aan dat een deel van de interindividuele verschillen verklaard zou kunnen worden door mogelijke verschillen in spiermorfologie, ondanks dat dit alleen effectief was voor de energiegerelateerde kostfunctie. Interindividuele verschillen zouden tevens verklaard kunnen worden door een verschil in aanpak bij het omgaan met stabiliteit. Mogelijk is een goede validatie van kostfuncties daarom niet mogelijk zonder stabiliteit als randvoorwaarde (constraint) mee te nemen.